

УДК 621.793.71

М.П. Кравченко, асп., Л.Г. Полонський, д-р техн.наук, проф.  
Житомирський державний технологічний університет, м.Житомир, Україна

## ЗМІНА ЯКОСТІ ОБРОБЛЕНИХ ПОВЕРХОНЬ ГАЗОТЕРМІЧНИХ ПОКРИТТІВ ПРИ ПОШАРОВОМУ ТОЧІННІ

*Исследованы параметры качества обработанной поверхности в зависимости от ее расположения по глубине газотермического напыленного покрытия. Показаны изменения свойств покрытия по параметрам шероховатости  $R_a$ , микротвердости  $H_\mu$ , силы резания  $P$ . Приведена структура покрытия из которой видно, что приповерхностный слой ~20% от толщины покрытия является дефектным. Именно этот слой рекомендуется снимать при механической обработке как припуск, в результате чего имеется возможность получить рабочую поверхность детали с повышенными механическими характеристиками.*

*The parameters of quality of the machined surface are investigated depending on its location in the depth of gas-thermal sprayed coating. The changes of the properties of the coatings on the parameters of roughness  $R_a$ , the microhardness  $H_\mu$ , cutting force  $P$  are showed. It also given the structure of the coating, which shows that the **near-surface** layer of ~20% of coating thickness is defective. The **above-mentioned layer** is recommended to remove during the machining as an allowance which permits to get a working surface of parts with improved mechanical characteristics.*

**Постановка проблеми у загальному вигляді.** Відомо, що напилені газотермічні покриття (ГТП) за своєю природою є гетерогенними (мають різні фізико-механічні властивості і будову по товщині). Наприклад, в роботі [1] показано залежність  $R_a$  оброблених поверхонь від глибини їх розташування в товщі покриття (при обробці з різним сумарним припуском), за якою видно, що на поверхнях, сформованих на різних глибинах покриття, шорсткість є неоднаковою. Зрозуміло, що це необхідно враховувати при формуванні поверхневого шару обробкою різанням. Іншими словами, під час кінцевої обробки, у разі призначення різних припусків, ми отримаємо різну шорсткість, і, очевидно, твердість, зносостійкість тощо обробленої поверхні.

У зв'язку з таким станом речей, призначення оптимального припуску постає як проблемне при обробці (особливо, кінцевій) покриттів. Для вірного призначення припуску на обробку необхідно знати структуру покриття на різних глибинах, якісні та кількісні залежності фізико-механічних властивостей поверхонь, оброблених зняттям прошарків покриття різної сумарної товщини (зняттям різного припуску).

Результати досліджень і рекомендації з цього питання, наведені у публікаціях [2, 3–7], охоплюють лише проблему розмірної обробки покриттів. Аналіз цих робіт дозволяє певною мірою узагальнити значення рекомендованих товщин покриттів і величин припусків на їхню кінцеву обробку з точки зору отримання необхідних розмірів. Наприклад, у [2] мінімальний односторонній припуск  $Z_{min}$  при обробці покриттів незалежно від їхньої товщини рекомендується приймати у межах 0,4 мм. В цій же роботі рекомендується товщину напилюваного шару робити більшою на 0,2...0,3 мм за номінальний розмір деталі, але при цьому автор не пов'язує товщину покриття з припуском на обробку. Тобто, властивості прошарків покриття абсолютно не враховуються при розрахунках. Вольперт Г.Д. у [8] наводить таблицю, в якій подає товщини зносостійких покриттів та припуски на їх механічну обробку. При діаметрі вала до 50 мм товщина покриття, виходячи з умов міцності, після обробки, за його даними, повинна бути не менше 0,5 мм, припуск на обробку також рекомендується у межах 0,5 мм. Тобто, як бачимо, половина товщини напиленого покриття знімається під час кінцевої обробки. Очевидно, що при виконанні цих рекомендацій спостерігається нерациональне і неекономне витрачання напилюваних матеріалів, як правило, дорогих за ціною. Наприклад, 1 кг порошку системи  $Ni-Cr-B-Si$  коштує ~270 грн. Така неоднозначність підходів до вибору припуску на обробку покриттів різної товщини вимагає подальших досліджень щодо підбору оптимального співвідношення між товщиною покриття і припуском, а також глибини попередньої обробки основи під покриття, з метою забезпечення найліпших експлуатаційних показників оброблених поверхонь деталей машин.

**Основний матеріал.** Процес газотермічного напилення покриття – це поетапне нашарування часток порошку, що нагріваються до відповідної температури і розганяються струменем газу, прохід за проходом. При нанесенні покриття теплота, що виділяється при горінні, розплавляє або пластифікує частки напилюваного матеріалу. Крім того, вона дає можливість підігрівати поверхню основи в зоні напилення. Отже, при напиленні ГТП частина теплоти, що утворюється при спалюванні горючого газу, передається і на деталь. Полум'я викликає послідовне рівномірне підвищення температури поверхні за рахунок теплообмінних процесів. Нагрів напилюваним матеріалом відбувається внаслідок контакту великої кількості часток, що удараються, розтікаються, твердіють і віддають своє тепло деталі і одна одній.

Існують математичні методи підрахунку температури будь-якої точки деталі з покриттям. Також встановлено, що для міцного зчеплення часток цієї температури не завжди достатньо. Хоча навколо часток відбувається інтенсивне нагрівання і градієнти температури сягають  $10^5$  град/см, розрахунки показують, що глибина зони термічної дії під часткою в кінці стадії твердіння не перевищує всього декількох десятків мікрон. Тому процеси фізико-хімічної

взаємодії при напilenні не зачіпають об'єму матеріалу деталі, а проходять, в основному, в шарі покриття, який має низку аномальних властивостей. Вивчення кінетики з'єднання між собою розплавлених і пластифікованих часток напилуваного матеріалу використовується для дослідження властивостей цього шару [9].

При ударі об поверхню напилуваної деталі сферичні частки порошку деформуються, твердіють і набувають форми тонкого диска. Висока швидкість деформації і розплавлення часток призводить до контакту матеріалів між собою і з деталлю на межі взаємодії.

Сукупна дія температур нагрівання напилуваних часток і підігріву деталі, температури навколишнього середовища забезпечує умови для формування по товщині покриття трьох зон, що значно відрізняються між собою за фізико механічними властивостями і структурою. При використанні покриттів із метою зміцнення або відновлення деталей бажано знати глибину залягання і товщину найбільш прийнятної за своїми експлуатаційними характеристиками прошарку покриття, щоб призначати відповідний оптимальний припуск на обробку цих покриттів.

Для визначення якості поверхневого шару та структури внутрішніх прошарків газополуменового покриття з порошку ПГ-12Н-01 проведено мікроструктурний аналіз. За допомогою оптичного мікроскопу МІМ-10 розглядалися мікрошліфи з полірованими поверхнями. Дослідження мікроструктури покриття проводились на „прямих” шліфах, затиснутих у струбцинах.

На рис. 1 наведено мікроструктуру газополуменового напилуваного покриття, з якого чітко видно розподіл шару покриття на зони. В зоні А знаходиться прошарок, в якому частки напилуваного матеріалу мають понижений механічний і хімічний зв'язок, тому що при напilenні поверхня і вже сформований шар покриття недостатньо розігріті.

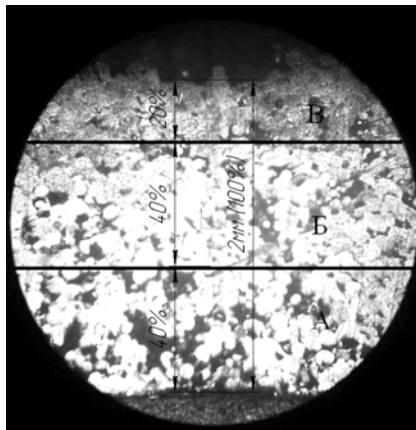


Рис. 1. Мікроструктура газополуменового напилуваного покриття з самофлюсівного порошку ПГ-12Н-01 товщиною 2 мм (х63)

Середній прошарок (зона Б) має достатньо щільну структуру, велику когезію і, відповідно, зносостійкість, твердість та ін. Для міцного з'єднання часток в цьому прошарку вже сформований шар має достатню температуру для утворення між напилуваними частками міцного хімічного зв'язку (енергія достатня для подолання атомами напилуваного порошку енергетичних бар'єрів спокою [9]), що забезпечує зменшення його пористості порівняно з зоною А.

В зоні В частки між собою також з'єднані міцно, але цей прошарок, що займає, як видно з рис. 1, ~ 20 % товщини покриття, неякісний через те, що окисли, флюс, інші вкраплення спливають на поверхню.

Поділ шару покриття на три зони широко відомий у техніці газотермічного напилування, але це явище практично не використовується при проектуванні технологічних процесів формування та механічної обробки деталей з покриттями.

Іноді при визначенні основної складової загальної товщини покриття, а саме – мінімальної робочої товщини покриття (тобто, того шару покриття, що залишається після зняття припуску),

здійснюють її розрахунок за аналітичним виразом

$$t_{\text{п.мін.}} = t_{\text{п.н}} + t_{\text{п.з}} + R_{\text{zh}} + W_h,$$

де:  $t_{\text{п.н}}$  – товщина прошарку покриття, достатня та необхідна для забезпечення нормального функціонування виробу;  $t_{\text{п.з}}$  – товщина прошарку покриття на знос, яка забезпечує необхідний ресурс роботи виробу;  $R_{\text{zh}}$  – висота нерівностей, отриманих на кінцевому переході обробки покриття (враховується у випадках роботи покриття в корозійних середовищах та при інших умовах експлуатації, коли процес руйнування покриття залежить від топографії поверхні);  $W_h$  – висота хвилястості (враховується аналогічно  $R_{\text{zh}}$ ) [10]. Користуватися цією залежністю у більшості випадків неможливо через відсутність у довідниках кількісних значень вихідних даних (тих же  $t_{\text{п.н}}$ ,  $t_{\text{п.з}}$ ,  $R_{\text{zh}}$  та  $W_h$ ). Також при цьому велика ймовірність зняття тієї частини покриття, що має найприйнятніші експлуатаційні показники, у вигляді припуску, попадання робочої (обробленої) поверхні в зону В (див. рис. 1) або того, що в товщу прошарку покриття на знос попадуть прошарки із зони В (див. рис. 1).

З метою виправлення такого становища нами проведено низку досліджень з призначення припусків на обробку ГТП системи *Ni-Cr-B-S* за критеріями шорсткості, сили різання, мікротвердості. А оскільки провідне значення в призначенні припусків на обробку покриттів має той факт, що вони гетерогенні, – виконано низку експериментів з метою визначення місця розташування прошарків з підвищеними експлуатаційними характеристиками.

Таблиця. 1

Шорсткість  $Ra$  оброблених поверхонь, розташованих на різних глибинах (покриття ПГ-12Н-01 товщиною 2 мм)

Припуск, мм	$Ra$ , мкм	Припуск, мм	$Ra$ , мкм	Припуск, мм	$Ra$ , мкм
0,13	0,64	0,65	0,72	1,30	0,52
0,20	1,56	0,75	1,32	1,58	0,76
0,30	0,88	0,85	0,52	1,65	1,92
0,38	0,68	0,98	1,52	1,83	0,89
0,48	1,15	1,13	0,62	1,93	2,15
0,55	0,82	1,18	1,25		

За об'єкт дослідження в експериментах вибрано циліндричний зразок  $\varnothing 36$  мм із шаром покриття ПГ-12Н-01 товщиною 2 мм, обробка якого проводилася по черзі на різних глибинах шляхом зняття припусків, величини котрих приведені в табл. 1–3. На основі отриманих даних побудовано графічні залежності, усереднення яких за допомогою методу найменших квадратів дозволило відобразити лінію тренда (рис. 2–4).

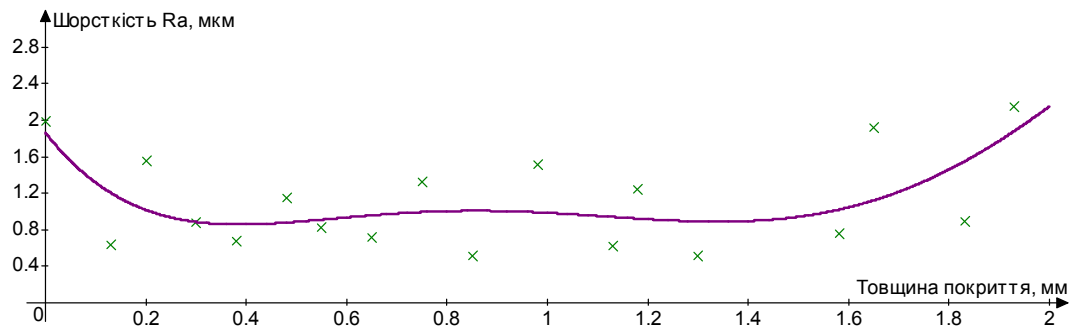


Рис. 2. Графік зміни шорсткості  $R_a$  поверхонь, розташованих на різних глибинах (покриття ПГ-12Н-01 товщиною 2 мм)

Вимірювання  $R_a$  проводилося з використанням профілографа-профілометра *Talysurf 6*. Як видно з графіка (див. рис. 2), по всій товщині покриття прослідковується прошарок, в якому  $R_a$  має найменші значення. Він знаходиться на глибинах від 0,4 мм до 0,6 мм, займаючи при цьому проміжок у межах 20 %...30 % (в середньому – 25 %) від товщини покриття.

Для вимірювання  $H_\mu$  використовувався мікротвердомір ПМТ-3. Мікротвердість (табл. 2) вимірювалася після кожного проходу інструменту, коли пошарово знімалося покриття по всій товщині. Як видно з рис. 3, найкращі показники  $H_\mu$  по всій товщині покриття має прошарок, який знаходиться в межах 0,3...0,5 мм від поверхні.

Таблиця. 2

Мікротвердість  $H_\mu$  оброблених поверхонь, розташованих на різних глибинах (покриття ПГ-12Н-01 товщиною 2 мм)

Припуск, мм	$H_\mu$ , МПа	Припуск, мм	$H_\mu$ , МПа	Припуск, мм	$H_\mu$ , МПа
0,18	459,5	0,89	429,5	1,51	382,5
0,29	480,5	1,02	408,0	1,65	410,0
0,38	512,5	1,19	428,5	1,72	426,5
0,52	519,5	1,24	487,0	1,85	435,5
0,65	525,0	1,31	418,0	1,92	217,5
0,76	492,5	1,38	426,5	1,98	290,5

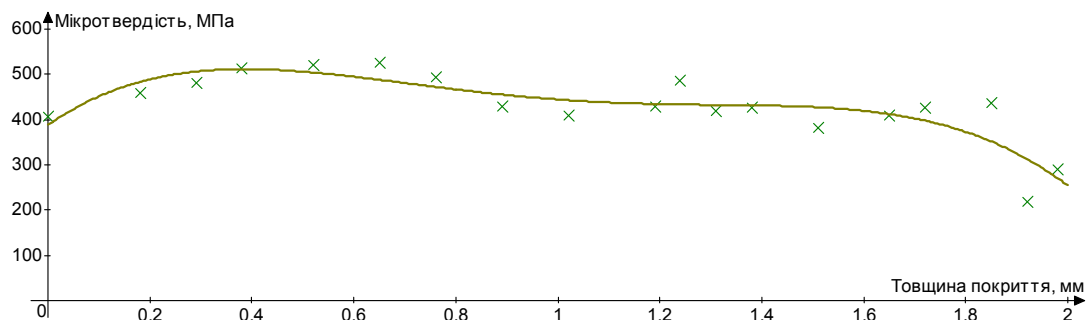


Рис. 3. Графік зміни мікротвердості  $H_\mu$  поверхонь, розташованих на різних глибинах (покриття ПГ-12Н-01 товщиною 2 мм)

Сила різання  $P$  вимірювалася універсальним динамометром УДМ-600 конструкції „ВНДІнструмент”. Дані вимірювань складових сили різання усереднювалися в одну результуючу силу  $P$  спеціально розробленим комп'ютеризованим апаратно-програмним комплексом. Це дало можливість проводити запис і обробку інформації в режимі реального часу. Завдяки чому, на основі результатів експерименту (табл. 3) з графічної залежності на рис. 4 бачимо, що найбільші значення сили різання спостерігаються при знятті прошарків покриття в діапазоні 0,5...0,6 мм від поверхні. Про підвищену щільність структури, когезію та, відповідно, зносостійкість і твердість саме у цьому прошарку говорить те, що сила  $P$  при обробці поверхонь у його товщі є найбільшою.

З результатів першого, другого і третього експериментів видно, що вони корелюються між собою. Глибини розташування прошарків з підвищеними механічними властивостями за трьома параметрами близькі між собою (для  $R_a$  – це 0,4...0,6 мм; для  $H_\mu$  – це 0,3...0,5 мм; для  $P$  – це 0,5...0,6 мм).

Таблиця. 3

Сила різання  $P$  при обробці поверхонь, розташованих на різних глибинах (покриття ПГ-12Н-01 товщиною 2 мм)

Припуск, мм	$P$ , Н	Припуск, мм	$P$ , Н	Припуск, мм	$P$ , Н
0,15	59	0,90	65	1,65	62
0,30	65	1,05	67	1,80	61
0,45	71	1,20	67	1,95	55
0,60	69	1,35	57	2,0	52
0,75	65	1,50	64		

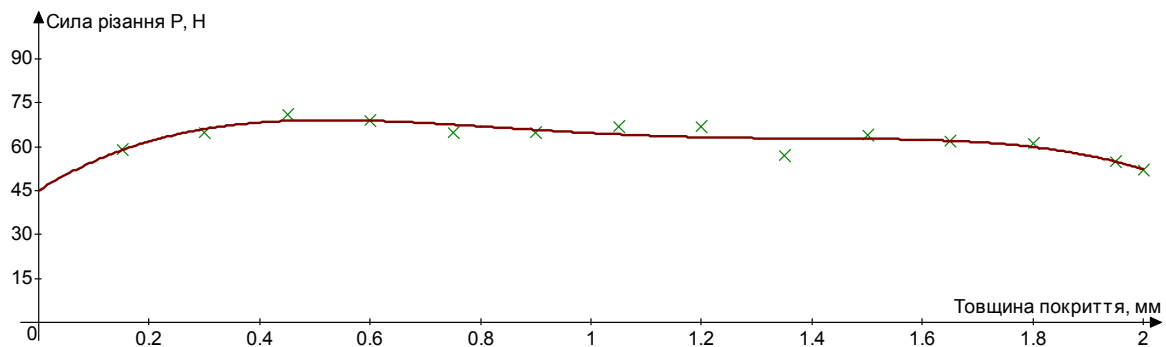


Рис. 4. Графік зміни сили різання  $P$  при обробці поверхонь, розташованих на різних глибинах (покриття ПГ-12Н-01 товщиною 2 мм)

**Висновок.** На підставі вищевикладеного матеріалу можна зробити висновок, що газотермічні покриття мають по своїй товщині прошарки, в яких показники якості  $Ra$ ,  $H_c$  і міцності та щільності за значеннями сили різання  $P$  є найліпшими на відстані 0,3...0,6 мм від поверхні. Прошарок, що має нижчі механічні показники і дефектні включення становить ~ 20 % загальної товщини покриття від поверхні. При знятті цього прошарку як припуску на обробку, експлуатаційні показники поверхні будуть найбільш прийнятними для подальшої роботи виробу. Структура газотермічних покриттів із самофлюсівних порошків системи  $Ni-Cr-B-Si$  є змінною по товщині, чим пояснюється і зміна властивостей відмічених у роботі прошарків. А зміна властивостей останніх пов'язана зі зміною градієнта температури протягом процесу наплення та специфікою поверхонь основи і покриття. Проведені експерименти методи, застосовані у даній роботі, дають змогу визначити розташування найприйнятніших прошарків покриття і, відповідно, призначити оптимальний припуск на механічну обробку з точки зору довготермінової експлуатації робочої поверхні.

Виходячи з цього, можна також досліджувати показники якості ГТП по глибині і за іншими параметрами якості. Знання глибин розташування шарів з найприйнятнішими показниками цих параметрів дають можливість рекомендувати оптимальні величини товщин напильованого покриття і припуску для конкретних випадків обробки.

### Список літератури

1. Клименко С.А., Муковоз Ю.А., Полонский Л.Г., Мельничук П.П. Точение износостойких защитных покрытий. — К.: Техника, 1997. — 146 с.
2. Воловик Е.Л. Справочник по восстановлению деталей — М.: Колос, 1981. — 351 с.
3. Обработка деталей при восстановлении и упрочнении: Навч. посібник / Ю.О. Харламов, С.А. Клименко, М.А. Будаг'янц, Л.Г. Полонський — Луганськ: Вид-во СУНУ ім. В. Даля, 2007. — 500 с.
4. Газотермическое напыление покрытий: Сб. руководящих технических материалов. — К.: ИЭС им. Е.О. Патона, 1990. — 175 с.
5. Харламов Ю.А., Будаг'янц Н.А. Основы технологии восстановления и упрочнения деталей машин: Учебное пособие. — Луганск: Изд-во Восточно-укр. национ. ун-та им. В. Даля, 2003. — В 2-х т. — Т. 2. — 480 с.
6. Искольдский И.И. Наплавочные боридные твердые сплавы. — М.: Машиностроение, 1965. — 71 с.
7. Ресурсо- и энергосберегающие технологии в промышленности: Матер. конф. (4–6 сентября 1996 г., г. Одесса). — К.: Об-во „Знание” Украины, 1996. — 158 с.
8. Вольперт Г.Д. Покрытие распыленным металлом (металлизация). — М.: Промстройиздат, 1957. — 268 с.
9. Кудинов В.В. Плазменные покрытия. — М.: Металлургия, 1978. — 120 с.
10. Газотермические покрытия из порошковых материалов: Справ. / Ю.С. Борисов, Ю.А. Харламов, С.Л. Сидоренко, Е.Н. Ардатовская. — К.: Наук. думка, 1987. — 544 с.